

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 05.05.2022 22:36:08  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb1955741cc94311e50b73e4

**МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**«Юго-Западный государственный университет»**  
**(ЮЗГУ)**

**Кафедра нанотехнологий, микроэлектроники,**  
**общей и прикладной физики**

**УТВЕРЖДАЮ**

**Проректор по учебной работе**

**О.Г. Локтионова**

« 15 » 01 2021 г.



**МУЛЬТИФЕРРОИКИ**

**методические указания к выполнению лабораторных работ**  
**для студентов направления подготовки**  
**28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»**

**Курск – 2021**

УДК 534.2

Составители: А.В. Кузько, А.Е. Кузько.

Рецензент

Директор РИЦ, д.ф.-м.н., профессор А.П. Кузьменко

**Мультиферроики:** методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направления подготовки 28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»/ Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Кузько А.В., Кузько А.Е. Курск, 2021. 31 с.: ил. 9. Библиогр.: с. 31.

Излагаются методические рекомендации по выполнению лабораторных работ, в которых изучаются эффект Холла (как основа работы большинства современных магнетометров), гистерезис намагничивания в ферромагнетике (основа работы магнитной памяти) и поляризации в сегнетоэлектрике (основа работы варикондов – конденсаторов с переменной емкостью), фазовый переход «ферромагнетик-парамагнетик» (особенности работы с ферромагнитными и сегнетоэлектрическими материалами).

Методические указания соответствуют требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования и учебного плана направления подготовки 28.04.01 Нанотехнологии и микросистемная техника, степень (квалификация) – магистр. Предназначены для студентов всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 15.01.2021. Формат 60 x 84 1/16.

Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 0,68. Тираж экз. Заказ 282. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

# ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧЕНИЯ И ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНЕТИКА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА В ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

**Цель работы:** исследования процессов перемагничивания ферромагнетиков в переменных магнитных полях.

**Принадлежности:** автотрансформатор ЛАТР-2,5(10А), мультиметр FLUKE-15b (2 шт.), комплект измерительных катушек, вольтметр переменного тока GVT-417 В (2 шт.), два добавочных и одно эталонное сопротивление, ключ, осциллограф С1-112 (9800), образцовое сопротивление 1 Ом, регулировочный реостат.

### Теоретическое введение

**ВНИМАНИЕ!!!** Работа с электричеством даже при низком напряжении может быть опасной - внимательно следуйте схемам подключения и инструкциям и всегда обращайтесь за советом к преподавателю, если вы в чем-то не уверены! При выполнении каждой лабораторной и практической работы необходимо соблюдать инструкцию по технике безопасности, которая размещена на сайте кафедры <https://swsu.ru/structura/up/ftd/kafedra-nt/instruktsii.php>

В проводниках, находящихся в переменных магнитных полях, вихревые токи создают магнитный поток, направленный противоположно внешнему магнитному полю. Индукция, создаваемая вихревыми токами, равна нулю на поверхности образца и увеличивается по мере приближения к его внутренним областям.

Потери на вихревые токи приводят к разогреву магнитопровода. Для уменьшения вихревых токов сердечники трансформаторов, дросселей и т. д. изготавливают из тонких листов магнитомягкой стали.

Отношение максимальной индукции образца  $B_m$  к максимальному значению напряженности внешнего поля  $H_m$  дает амплитудное значение динамической магнитной проницаемости ферромагнетика в переменном магнитном поле:

$$\mu = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}. \quad (1)$$

Почти у всех материалов статическая и динамическая магнитные проницаемости имеют значительное различие даже на частоте 50 Гц, и только в случае тонких ферромагнитных пленок динамическая петля совпадает со статической петлей магнитного гистерезиса.

Из формулы (1) следует, что для определения кривой намагничивания в переменном магнитном поле необходимо измерять максимальные значения напряженности и индукции поля. Измерения могут быть проведены с помощью осциллографа по схеме, показанной на рис. 1.

Здесь в качестве исследуемого образца  $O$  используется тороид

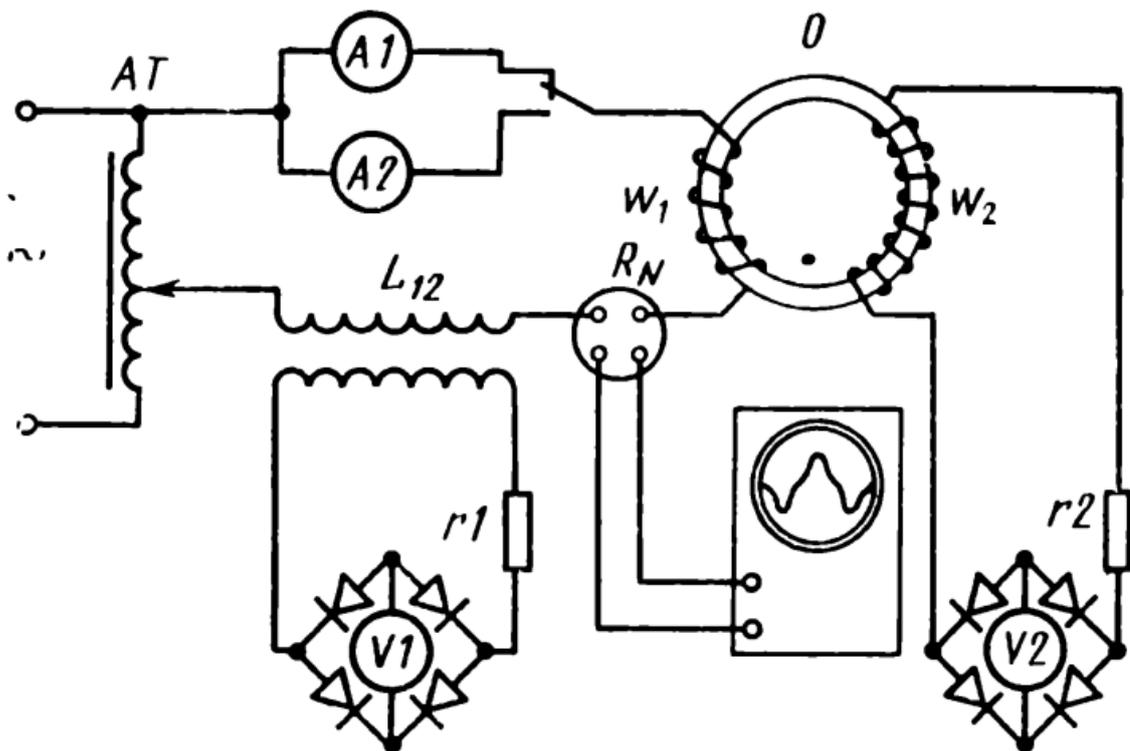


Рис. 1.

с намагничивающей  $\omega_1$  и измерительной  $\omega_2$  обмотками. Автотрансформатор  $AT$  позволяет регулировать ток в намагничивающей обмотке.

Для измерения действующих значений намагничивающего тока применяются амперметры  $A1$  и  $A2$  электромагнитной системы.

Для определения амплитудного значения тока в намагничивающей обмотке служат катушка взаимной индуктивности  $L_{12}$  и вольтметр  $V1$ , включенный в схему двухполупериодного выпрямителя, на основе германиевых диодов с добавочным резистором  $r1$ ;  $V1$  – вольтметр, включенный в аналогичную схему двухполупериодного выпрямителя с добавочным сопротивлением  $r2$ .

Следует помнить, что вольтметром измеряется не электродвижущая сила, а напряжение, отличающееся от э. д. с. на величину падения напряжения в самой измерительной обмотке.

В данном случае сопротивление измерительных цепей велико; следовательно, можно считать, что вольтметр  $V1$  измеряет среднее значение э. д. с. во вторичной обмотке катушки взаимной индукции, а вольтметр  $V2$  – среднее значение э. д. с. в обмотке  $\omega_2$ .

Сигнал, пропорциональный намагничивающему току, снимается с активного сопротивления  $R_N$  (1 Ом). Осциллограф служит для развертки формы кривой магнитной индукции и кривой напряженности магнитного поля.

Измерение максимального значения индукции магнитного поля можно произвести с помощью катушки взаимной индуктивности  $L_{12}$  и вольтметра  $V1$ .

Среднее значение э. д. с. во вторичной обмотке катушки взаимной индуктивности  $L_{12}$  за один полупериод будет

$$E_{cp.} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \varepsilon dt, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – мгновенное значение э. д. с. Поскольку

$$\varepsilon dt = d\Phi = L_{12} di, \quad (3)$$

где  $L_{12}$  – коэффициент взаимной индукции катушки, то подставляя (3) в (2), получим

$$E_{cp.} = \frac{2}{T} \int_{-i_m}^{+i_m} L_{12} di = 4L_{12}i_m / T = 4L_{12}f i_m [B]. \quad (4)$$

где  $f = 1/T = 50 \text{ Гц}$  – частота намагничивающего тока,  $i_m$  – амплитудное значение тока (в амперах). Учитывая, что

$$H_m = \frac{\omega_1 i_m}{2\pi r} \cdot 10^2, \quad (5)$$

где  $r$  – средний радиус тороида, и подставляя в (5) значение  $i_m$  из выражения (4), находим

$$H_m = \frac{\omega_1 E_{cp1}}{8\pi r f L_{12}} \cdot 10^2 [A / м]. \quad (6)$$

Среднее значение переменной э. д. с.  $E_{cp2}$  во вторичной обмотке образца за один полупериод может быть представлено в виде

$$E_{cp2} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \varepsilon dt = \frac{2}{T} \int_{-\Phi_m}^{+\Phi_m} d\Phi = \frac{2}{T} \int_{-B_m}^{+B_m} \omega_2 s dB = 4B_m \omega_2 s f, \quad (7)$$

откуда

$$B_m = \frac{E_{cp2}}{4\omega_2 s f}, \quad (8)$$

где  $\omega_2$  – число витков вторичной обмотки образца,  $s$  – площадь сечения образца.

При снятии кривой намагничивания на переменном токе большое значение имеют формы кривых напряженности магнитного поля и кривой магнитной индукции в зависимости от времени. Если бы катушка  $L_{12}$  в цепи (рис. 1) отсутствовала, то зависимости  $H$  и  $B$  от времени имели бы вид, указанный на рис. 2, а. Подключение катушки  $L_{12}$  приводит к искажению намагничивающего тока, а следовательно, и к несинусоидальному характеру зависимости  $H$  от времени (рис. 2, б). Влияние взаимной индуктивности катушек в намагничивающей цепи также приводит к искажению формы кривой магнитной индукции в средних и сильных магнитных полях.

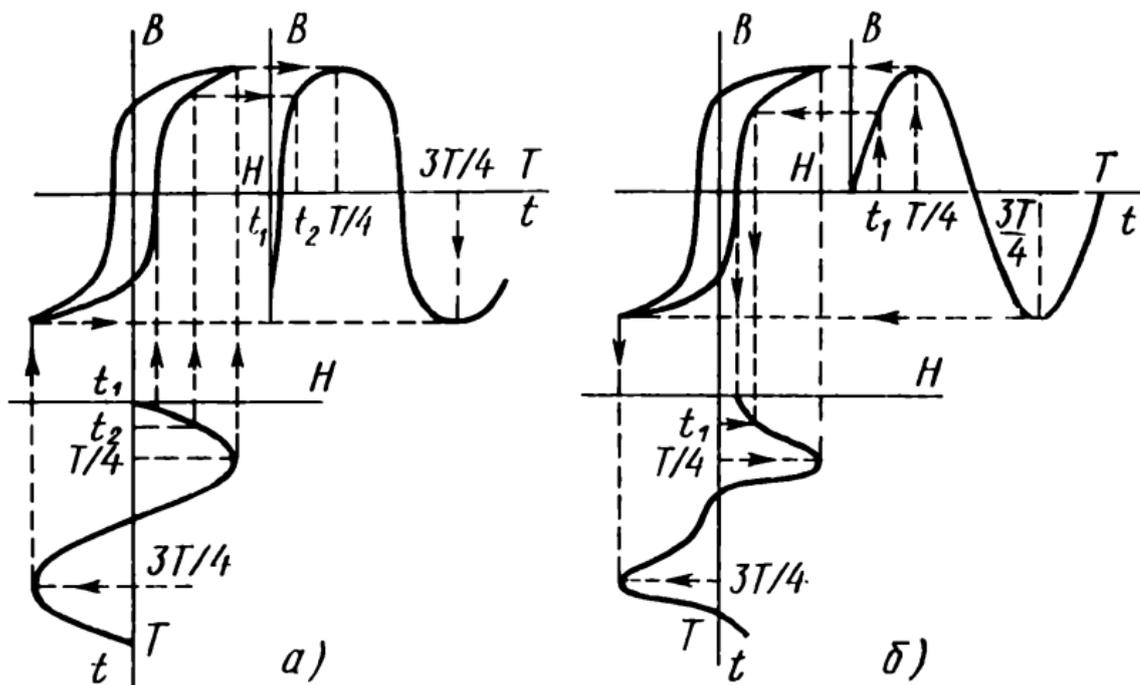


Рис. 2.

Показание амперметра, регистрирующего эффективное значение тока в намагничивающей цепи, умноженное на  $\sqrt{2}$ , будет выражать амплитуду тока эквивалентной синусоиды.

Максимальное значение напряженности намагничивающего поля по эквивалентной синусоиде определяют для тороида по формуле

$$H_{эфт} = \frac{\omega_1 i_{эф} \sqrt{2}}{2\pi r} \cdot 10^2, \quad (9)$$

где  $\sqrt{2} i_{эф}$  – действующее значение намагничивающего тока, А.

Часто кривую намагничения выражают в координатах  $B_m$ ,  $H_{эфт}$ . Необходимо помнить, что ампер-витки измерительной обмотки ( $\omega_2 i_2$ ) вносят искажения в магнитное состояние образца. Чтобы пренебречь искажением, необходимо выполнение условия

$$\omega_1 i_1 \gg \omega_2 i_2,$$

где  $\omega_1 i_1$  – ампер-витки намагничивающей катушки.

Так, при  $(\omega_2 i_2 / \omega_1 i_1) \leq 0,005$  влиянием ампер-витков вторичной обмотки можно пренебречь.

### Порядок выполнения работы

1. Пользуясь формулами (4), (6), (7), (8), рассчитать необходимые средние значения  $E_{cp1}$  и  $E_{cp2}$  для определения кривой намагничения образцов.

2. Произвести градуировку шкал вольтметров на постоянном токе по пределам, рассчитанным в п. 1, в единицах индукции по схеме рис. 3.

3. Определить кривые намагничения в координатах  $B_m, H_m$  и  $B_m, H_{эфт}$ , произвести их графическое построение. Для этого подавать в намагничивающую цепь

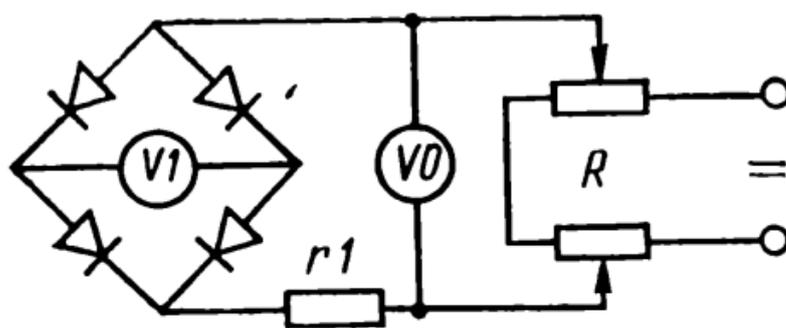


Рис. 3.

последовательные значения тока, задаваемые по показаниям вольтметра  $V1$  (рис. 1). Определить по показаниям амперметров  $A1$  и  $A2$  (рис. 1) эффективные значения тока и по показаниям вольтметра  $V2$  – соответствующие им значения  $E_{cp2}$  во вторичной цепи.

По формулам (6), (7) и (8) вычислить значения  $B_m, H_m, H_{эфт}$  и построить кривые намагничения.

4. При определении кривой намагничения (или при повторных измерениях) скопировать с экрана осциллографа несколько разверток кривых напряженности магнитного поля (форма кривой намагничивающего тока) при средних и максимальных величинах индукции.

5. Снять петлю гистерезиса с помощью осциллографа.

Петлю гистерезиса на экране осциллографа можно получить следующим образом.

Ферромагнетик помещается в магнитное

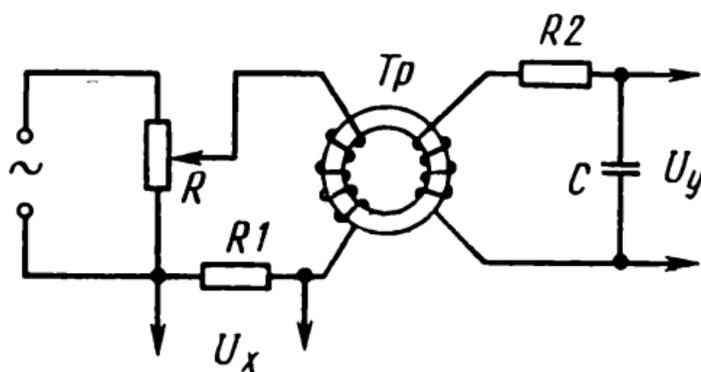


Рис. 4.

поле, создаваемое переменным током. На горизонтально отклоняющие пластины подается напряжение  $U_x$ , пропорциональное  $H$ , а на вертикально отклоняющие –  $U_y$ , пропорциональное  $B$ . Принципиальная схема установки для наблюдения петли гистерезиса приведена на рис. 4.

В качестве исследуемого вещества удобно использовать ферритовый тороид  $Tr$ . Если первичная обмотка тороида питается через сопротивление  $R_1$  переменным током  $i_{\sim}$ , то величина напряженности магнитного поля внутри полого тороида определяется по формуле

$$H = \mu_0 \omega_1 i_{\sim},$$

где  $\omega_1$  – число витков на 1 см. Тогда напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах осциллографа пропорционально напряженности магнитного поля  $H$ :

$$U_x = i_{\sim} R_1 = \frac{R_1}{\mu_0 \omega_1} H.$$

Во вторичной обмотке тороида источником тока  $i$  является э.д.с. индукции  $E$ , равная

$$E = -\frac{d\Phi}{dt},$$

где  $\Phi$  – поток вектора магнитной индукции через поверхность, охватываемую всеми витками вторичной катушки. Если  $s$  – площадь, охватываемая одним витком, а  $\omega_2$  – число витков, тогда

$$\Phi = Bs\omega_2, \quad E = -s\omega_2 \frac{dB}{dt}.$$

Пренебрегая самоиндукцией, запишем закон Ома для вторичной цепи:

$$E = U_C + iR_2, \tag{10}$$

где

$$U_C = U_y = \frac{q}{C} = \frac{1}{C_0} \int_0^t i dt. \tag{11}$$

Здесь  $U_C$  – напряжение на обкладках конденсатора,  $C$  – емкость,  $q$  – заряд конденсатора. Если  $R_2$  велико ( $R_2 = 10^5$  Ом), то первым членом в формуле (10) можно пренебречь:

$$E = iR_2 = -s\omega_2 \frac{dB}{dt}, \tag{12}$$

откуда

$$i = -\frac{s\omega_2}{R_2} \frac{dB}{dt}.$$

Подставляя значение  $i$  в выражение (11), получим, что напряжение, подаваемое на вертикально отклоняющие пластины осциллографа, равно

$$U_y = -\frac{\omega_2 s}{R_2 C} \int_0^B \frac{dB}{dt} dt = -\frac{\omega_2 s}{R_2 C} \int_0^B dB = -\frac{\omega_2 s}{R_2 C} B, \quad (13)$$

т. е. пропорционально  $B$ .

В результате на одни пластины подается напряжение, пропорциональное  $H$ , а на другие – пропорциональное  $B$ , и на экране получается петля гистерезиса  $B = f(H)$ .

За один период синусоидального изменения тока след электронного луча на экране опишет полную петлю гистерезиса, а за каждый последующий период в точности повторит ее; поэтому на экране будет видна неподвижная петля гистерезиса. Увеличивая с помощью потенциометра  $R$  напряжение  $U_x$ , мы будем увеличивать амплитуду колебаний  $H$  и получать на экране последовательно ряд различных по своей площади петель гистерезиса.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков план проведения измерений по кривой намагничения и петли гистерезиса ферромагнетика?
2. Исходя из составленного плана проведения измерений, проанализируйте перечень необходимого оборудования для определения вида кривой намагничения ферромагнетика?
3. Для чего при планировании измерений гистерезиса необходимо использовать ферромагнитный образец в форме торроида?
4. Каким информационным ресурсом нужно воспользоваться, чтобы найти инструкцию менеджмента безопасности лабораторий кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики?
5. В чем отличие петель гистерезиса магнитомягкой и магнито жесткой стали?
6. Как определить коэрцитивную силу стали по кривой гистерезиса?
7. Почему сердечники трансформаторов, дросселей и т. д. набираются из отдельных пластин?
8. Почему ток в намагничивающей катушке носит нелинейный характер?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЭФФЕКТА ХОЛЛА КАК ПРИНЦИПА РАБОТЫ МАГНИТОМЕТРА

**Цель работы:** Исследование механизмов электрической проводимости в легированном германии с эффектом Холла.

**Приборы и принадлежности:** базовый аппарат для изучения эффекта Холла, легированный донорной примесью германий на печатной плате, легированный акцепторной примесью германий на печатной плате, датчик магнитного поля  $\pm 2000$  мТл, катушка модели D на 600 витков, U-образный сердечник, пара полюсных наконечников и зажимных скоб для изучения эффекта Холла, трансформатор с выпрямителем, источник питания постоянного тока, универсальный цифровой измерительный прибор, прибор ЗВ NETlog™, набор из 15 безопасных соединительных проводов для опытов длиной 75 см. программное обеспечение ЗВ NETlab™

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

**ВНИМАНИЕ!!!** Работа с электричеством даже при низком напряжении может быть опасной - внимательно следуйте схемам подключения и инструкциям и всегда обращайтесь за советом к преподавателю, если вы в чем-то не уверены! При выполнении каждой лабораторной и практической работы необходимо соблюдать инструкцию по технике безопасности, которая размещена на сайте кафедры <https://swsu.ru/structura/up/ftd/kafedra-nt/instruktsii.php>



**Эффект Холла** наблюдается в электропроводящих материалах, помещенных в магнитное поле  $B$ . Этот эффект обусловлен силой Лоренца, которая изменяет направление движения носителей заряда, создавая электрический ток  $I$ , протекающий в образце материала перпендикулярно по отношению к магнитному полю, и направлением тока. Разделение зарядов приводит к появлению электрического поля  $E_H$ , которое перпендикулярно направлению тока и компенсирует силу Лоренца, создавая напряжение Холла  $U_H$  между краями образца. Знак напряжения Холла меняется в зависимости от того, обусловлен ли один и тот же ток  $I$  положительными или отрицательными носителями заряда. Его значение зависит от плотности носителей заряда. Следовательно, эффект Холла представляет собой важное средство определения механизмов переноса зарядов в проводящих материалах и часто используется для изучения легированных полупроводников.

В этом опыте кристаллы легированного германия исследуются в диапазоне температур от 300 К до 450 К, чтобы убедиться в разнице проводимости, достигаемой за счет легирования, и собственной проводимости, получаемой за счет тепловой активации электронов, вызывающей их переход из валентной зоны в зону проводимости.

Кристаллы представляют собой плоские образцы, которые имеют длину  $a$ , ширину  $b$  и толщину  $d$ , и проводят ток  $I$  в продольном направлении. Магнитное поле  $B$  пронизывает каждый образец перпендикулярно направлению тока. Возникающее в результате напряжение Холла равно:

$$U_H = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d}. \quad (1)$$

Коэффициент Холла составляет:

$$R_H = \frac{1}{e} \cdot \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{(n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n)^2}, \quad (2)$$

$e = 1.602 \cdot 10^{-19}$  Кл (элементарный заряд).

Плотности  $n_n$  и  $n_p$ , соответственно, электронов в зоне проводимости и дырок в валентном слое, а также подвижности (mobility)  $\mu_n$  и  $\mu_p$ , соответственно, электронов и соответствующих им дырок являются величинами, характеризующими данный материал, которые зависят от температуры образца  $T$ .

Помимо напряжения Холла, в данном опыте измеряется падение напряжения в продольном направлении  $U$  в образце для определения электропроводности:

$$\sigma = e \cdot (n_n \cdot \mu_n + n_p \cdot \mu_p). \quad (3)$$

В процессе этого также определяется подвижность Холла:

$$\mu_H = R_H \cdot \sigma = \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n}. \quad (4)$$

На плотности носителей заряда  $n_n$  и  $n_p$  влияет легирование, т.е. включение инородных атомов в кристалл. В случае легирования акцепторной примесью атомы акцептора связывают электроны из валентной зоны и тем самым образуют дырки в этой зоне. В случае легирования донорной примесью каждый атом донора отдает один электрон в зону проводимости. Легированные кристаллы электрически нейтральны, т.е. их отрицательные и положительные заряды компенсируют друг друга. Соответственно:

$$n_n + n_A = n_p + n_D, \quad (5)$$

$n_A$ : концентрация акцепторов,

$n_D$ : концентрация доноров.

Кроме того,  $n_n$  и  $n_p$  связаны законом действующих масс, количество пар «электрон - дырка», которые образуются и рекомбинируют в единицу времени, одинаково в состоянии равновесия, которое зависит от температуры. К ним применимо следующее выражение:

$$n_n \cdot n_p = n^2, \quad (6)$$

$n_i$  - плотность носителей заряда в случае только собственной проводимости.

Поэтому в общем случае имеем:

$$n_n = \sqrt{n_i^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_D - n_A}{2}, \quad (7)$$

$$n_p = \sqrt{n_i^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_A - n_D}{2}. \quad (8)$$

При комнатной температуре концентрации  $n_A$  и  $n_D$  существенно выше плотности носителей заряда в случае только собственной проводимости  $n_i$ . Следовательно:

$$R_H = -\frac{1}{n_D \cdot e}, \mu_H = \mu_n, \quad (9)$$

при добавлении донорной примеси при температуре 300 К

$$R_H = -\frac{1}{n_A \cdot e}, \mu_H = \mu_p$$

при добавлении акцепторной примеси при температуре 300 К.

Тогда плотность и знак носителей заряда можно получить непосредственно из коэффициента Холла. Подвижность носителей заряда эквивалентна подвижности Холла.

### **Задания и порядок выполнения работы**

1. Демонстрация эффекта Холла в легированном германии.

По мере того, как с увеличением температуры появляется больше носителей, обеспечивающих электрический ток, напряжение Холла убывает, пока не достигнет нуля.

В случае германия, легированного акцепторной примесью, знак напряжения Холла меняется, потому что возрастающая собственная проводимость приводит к доминирующему влиянию электронов, подвижность  $\mu_n$  которых выше. Проводимость, обусловленная легированием, преобладает при температурах ниже температуры инверсии, а собственная проводимость преобладает при температурах выше температуры инверсии.

При высоких температурах кристаллы, легированные донорными и акцепторными примесями, становятся неотличимы друг от друга, потому что:

$$n_n = n_p = n_i, R_H = -\frac{1}{n_i \cdot e} \cdot \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p}$$

Зависимость подвижности  $\mu_n$  от температуры не видна явным образом в коэффициенте Холла, потому что в обоих случаях:

$$\mu \sim T^{-\frac{3}{2}}$$

2. Измерить зависимость напряжения Холла от тока и магнитного поля при комнатной температуре.
3. Определить знак плотности и мобильности носителей заряда при комнатной температуре.
4. Измерить зависимость напряжения Холла от температуры образца.
5. Определить температуру инверсии; установить различия между примесной и собственной проводимостью в случае германия, легированного акцепторной примесью.

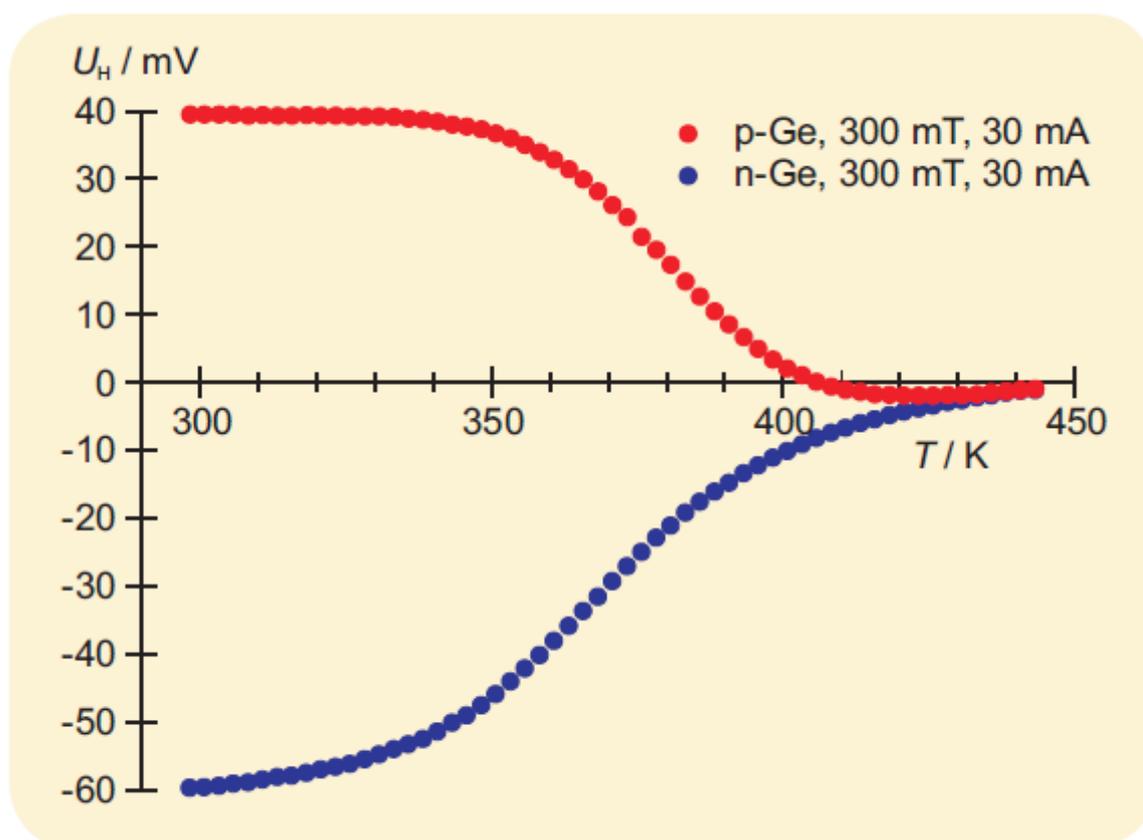


Рисунок 1 – Зависимость напряжения Холла в германии, легированном акцепторной и донорной примесью, от температуры T

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков план проведения измерений по исследованию эффекта Холла?

2. Исходя из составленного плана проведения измерений, проанализируйте перечень необходимого оборудования для определения ЭДС Холла?
3. Для чего при планировании данных измерений необходимо учитывать температуру образца?
4. Каким информационным ресурсом нужно воспользоваться, чтобы найти инструкцию менеджмента безопасности лабораторий кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики?
5. Чему равна постоянная Холла?
6. Каковы особенности эффекта Холла в полупроводниках?
7. Что такое подвижность электронов?
8. Как связаны подвижность электронов и проводимость вещества?
9. Где применяется эффект Холла?

## ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ГИСТЕРЕЗИСА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА

**Цель работы:** исследование петель диэлектрического гистерезиса сегнетоматериалов; измерение коэрцитивной силы, полной, остаточной, спонтанной и индуцированной поляризации керамического сегнетоэлектрика типа "вариконд ВК-1" осциллографическим методом.

**Принадлежности:** осциллограф С1-112 (9800), автотрансформатор ЛАТР-2,5(10А), потенциометр Р 363/1 Харьков м/с Приборы ПО-159, исследуемый сегнетоконденсатор, эталонный конденсатор, вольтметр переменного тока GVT-417 В (2 шт).

### Теоретическое введение

**ВНИМАНИЕ!!!** Работа с электричеством даже при низком напряжении может быть опасной - внимательно следуйте схемам подключения и инструкциям и всегда обращайтесь за советом к преподавателю, если вы в чем-то не уверены! При выполнении каждой лабораторной и практической работы необходимо соблюдать инструкцию по технике безопасности, которая размещена на сайте кафедры <https://swsu.ru/structura/up/ftd/kafedra-nt/instruktsii.php>

Любая молекула вещества представляет собой систему с суммарным электрическим зарядом, равным нулю. Однако центры распределения положительных зарядов ядер и отрицательных электронов в молекуле могут не совпадать. Такая молекула представляет собой *диполь*, существующий в отсутствие внешнего электрического поля. Диэлектрики, состоящие из молекул, у которых центры зарядов разных знаков пространственно смещены, называют *полярными* диэлектриками. Существует группа полярных диэлектриков, у которых дипольные моменты, связанные с элементарными ячейками кристаллической решетки, ориентированы в одном направлении. Таким образом, в отсутствие внешнего электрического поля, диэлектрик может обладать самопроизвольной, *спонтанной* поляризацией. Впервые это

явление было обнаружено для кристаллов сегнетовой соли, от названия которой подобные вещества стали называть *сегнетоэлектриками*.

Спонтанная поляризация сегнетоэлектрика наблюдается не во всей температурной области существования кристалла, а лишь ниже определенной температуры, называемой *температурой (точкой) Кюри  $T_C$* .

Характерным свойством сегнетоэлектрика является наличие у него *доменной структуры* – областей спонтанной поляризации. При температурах ниже точки Кюри  $T_C$  взаимодействие частиц кристалла приводит к тому, что он разбивается на микроскопические области, в пределах которых дипольные моменты элементарных ячеек устанавливаются параллельно друг другу. Области спонтанной поляризации называются *сегнетоэлектрическими доменами*. Впервые домены были обнаружены у титаната бария  $BaTiO_3$ . В отсутствие внешнего поля домены ориентированы таким образом, что результирующий дипольный момент всего кристалла равен нулю, так как поляризация одних доменов компенсируется противоположно направленной поляризацией соседних доменов. Выше температуры Кюри области спонтанной поляризации разрушаются тепловым движением частиц, и кристалл становится обычным диэлектриком. При температурах, лежащих ниже точки Кюри, кристаллическая модификация называется *полярной* или *сегнетоэлектрической фазой*, выше – *неполярной* или *параэлектрической*.

От обычных диэлектриков сегнетоэлектрики отличаются рядом характерных свойств. Температурные исследования установили, что в области точки Кюри диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = \epsilon(T)$  скачком изменяется в сотни раз, образуя резкие максимумы. Значения проницаемости у обычного диэлектрика составляют всего несколько единиц и, практически, не зависят от температуры и от напряженности внешнего поля, в то время как у сегнетоэлектрика она может принимать значения порядка нескольких тысяч. Например, у кристаллов  $BaTiO_3$  при комнатной температуре  $\epsilon \sim 150 \div 200$ , а при температуре Кюри  $T_C$   $\epsilon_{max} \sim 10000$ .

Исследования диэлектрических свойств сегнетоэлектрика показали аномальную зависимость его диэлектрической

проницаемости  $\epsilon$  от напряженности поля. Это проявляется, например, в нарушении линейного соотношения  $q = C \cdot \Delta\phi$ , связывающего заряд и разность потенциалов на пластинах конденсатора заполненного сегнетоэлектриком.

Следующей особенностью сегнетоэлектрика является сегнетоэлектрический гистерезис – неоднозначная зависимость вектора поляризации  $\vec{P}$  сегнетоэлектрика от внешнего электрического поля  $\vec{E}$ . Во внешнем электрическом поле происходит изменение направления поляризации в отдельных доменах. Это изменение таково, что векторы поляризации приближаются к положению, параллельному направлению внешнего поля, и тем ближе, чем больше напряженность внешнего поля. Поэтому поляризация сегнетоэлектрика возрастает (так как вектор поляризации есть электрический момент единицы объема диэлектрика, равный векторной сумме электрических моментов всех молекул, заключенных в единице объема  $\vec{P} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{p}_i$ ).

Зависимость поляризации от величины внешнего поля нелинейна.

При некотором значении поля  $E_H$  (см. рис. 1) все домены будут поляризованы в направлении поля, и поляризация будет иметь значение  $P_H$ . Дальнейшее увеличение поля ( $E > E_H$ ) приведет к линейному росту поляризации за счет индуцированной поляризации (индуцированная поляризация – поляризация, возникающая благодаря сдвигу ионов относительно друг друга, деформации электронных оболочек отдельных атомов, молекул, ионов и т.п.). Экстраполируя участок насыщения до пересечения с осью поляризации, т.е. к значению  $E = 0$ , получают значение спонтанной поляризации  $P_{cn}$ . Разность между значениями  $P_H$  и  $P_{cn}$  – индуцированная

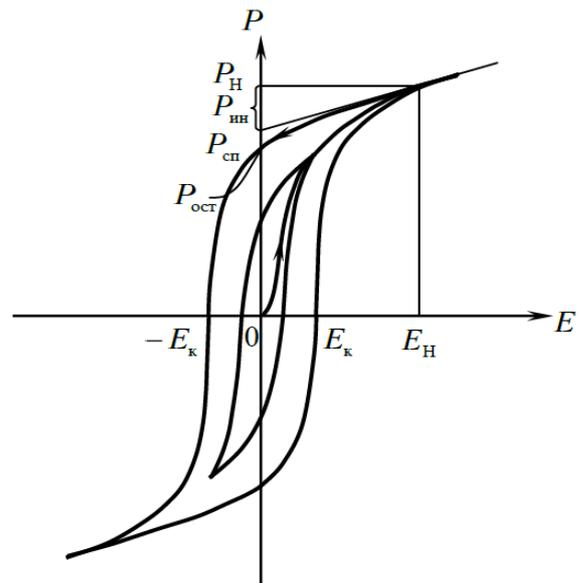


Рис. 1.

поляризация  $P_{ин}$  и  $P$ . Полученная кривая называется *основной кривой поляризации*.

При уменьшении напряженности внешнего электрического поля до  $E_n$  значение поляризации будет изменяться линейно, при дальнейшем уменьшении напряженности внешнего электрического поля значение поляризации будет уменьшаться медленнее, чем по основной кривой. При уменьшении поля до нуля у образца сохраняется так называемая *остаточная поляризация*  $P_{ост}$ .

Для того чтобы уменьшить поляризацию, надо приложить электрическое поле противоположного направления  $E_k$ , называемое *коэрцитивной силой*. При дальнейшем увеличении электрического поля обратного направления вновь достигается состояние насыщения  $P_n$ . При циклическом изменении поля графическая зависимость, характеризующая изменение поляризации образца, образует замкнутую кривую – *петлю сегнетоэлектрического гистерезиса*.

Если величину электрического поля циклически изменять в таких пределах, что насыщения поляризации не достигается, то получается *непредельная петля гистерезиса*. Во внешнем электрическом поле происходит изменение поляризации в отдельных доменах. Это изменение таково, что векторы поляризации приближаются к положению, параллельному направлению поля, и тем ближе, чем сильнее поле. В результате кристалл поляризуется (приобретает дипольный момент). Зависимость поляризации от напряженности электрического поля представлена на рис. 1.

Таким образом, поляризация сегнетоэлектриков является нелинейной функцией внешнего поля. Из этого следует, что диэлектрическая проницаемость зависит от напряженности поля. Для сегнетоэлектриков вводят понятие *эффективной диэлектрической проницаемости*, которую определяют как отношение максимальной величины вектора поляризации  $P_{max}$  к максимальному (амплитудному) значению напряженности поля  $E_{max}$  с множителем  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф / м}$ :

$$\epsilon_{эфф} = \frac{P_{max}}{\epsilon_0 E_{max}}.$$

Исследования показали, что вблизи точки Кюри диэлектрическая проницаемость подчиняется закону Кюри-Вейса:

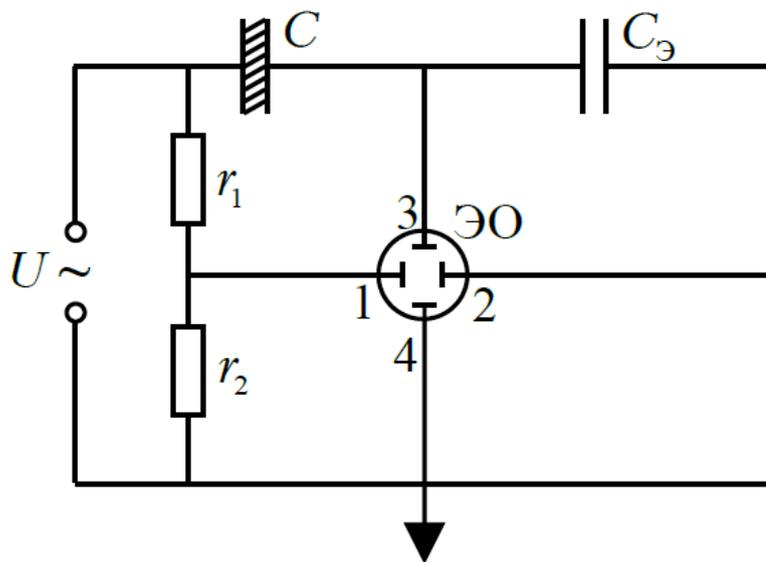
$$\varepsilon = \frac{C}{|T - T_C|},$$

где  $C$  – постоянная (для керамических сегнетоэлектриков  $C = 10^5 \text{ K}$ )  
 $T$  – температура сегнетоэлектрика,  
 $T_C$  – температура Кюри.

В силу нелинейных зависимостей поляризации и диэлектрической проницаемости от напряженности поля сегнетоэлектрики относятся к классу нелинейных элементов. В настоящее время сегнетоэлектрики используются для создания малогабаритных конденсаторов и нелинейных управляемых емкостных элементов – варикондов.

### Принцип действия лабораторной установки

В настоящей работе с помощью электронного осциллографа снимается петля гистерезиса керамического сегнетоэлектрика "вариконд ВК-1". При этом используется следующая схема (рис. 2).



**Рис. 2. Принципиальная схема установки**

Здесь  $r_1$  и  $r_2$  – делитель напряжения,  
 $C$  – исследуемый сегнетоконденсатор,  
 $C_3$  – эталонный конденсатор, подобранный так, чтобы  $C_3 \gg C$ ,  
ЭО – электронный осциллограф.

Переменное напряжение  $U$  подается на делитель напряжения, состоящий из сопротивлений  $r_1$  и  $r_2$ . На горизонтально отклоняющие пластины осциллографа 1–2 поступает напряжение

$$U_x = \frac{r_2}{r_1 + r_2} U. \quad (1)$$

Переменное напряжение  $U$  подается на последовательно соединенные конденсаторы  $C$  (исследуемый образец) и  $C_э$ . Поскольку величина емкости  $C_э \gg C$ , то  $U_C \gg U_э$  и можно считать, что  $U_C \approx U$ .

Напряженность поля в образце равна  $E = \frac{U}{d}$ , где  $d$  – расстояние между пластинами конденсатора  $C$ , из (1) следует:

$$U_x = \frac{r_2 d}{r_1 + r_2} E. \quad (2)$$

Таким образом, на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение  $U_x$  пропорциональное напряженности поля  $E$  в исследуемом конденсаторе  $C$ .

На вертикально отклоняющие пластины 3–4 подается напряжение  $U_y$  с эталонного конденсатора  $C_э$ . Покажем, что это напряжение пропорционально величине поляризации  $P$ .

Так как емкости  $C$  и  $C_э$  соединены последовательно, то  $q = CU_x = C_э U_э$ , где  $q$  – заряд на пластине конденсатора

$$U_э = \frac{CU_x}{C_э} = \frac{q}{C_э}.$$

Поскольку  $q = \sigma S$ , где  $\sigma$  – поверхностная плотность заряда,  $S$  – площадь пластины конденсатора  $C$ , то:

$$U_э = U_y = \frac{\sigma S}{C_э}.$$

Между поляризацией  $P$  и поверхностной плотностью зарядов имеется простая связь  $P = \sigma$  поэтому

$$U_э = U_y = \frac{S}{C_э} P. \quad (3)$$

Таким образом, на вертикально отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение, пропорциональное поляризации сегнетоэлектрика  $P$ .

Вследствие изложенного, на экране осциллографа при полном цикле изменения напряженности поля  $E$  получаем (в соответствующем масштабе) зависимость  $P = P(E)$ , то есть петлю гистерезиса.

Получив на экране осциллографа последовательно ряд петель гистерезиса, начиная с предельной, и измерив координаты их вершин  $x$  и  $y$ , можно построить основную кривую поляризации.

Если осциллограф заранее проградуирован, то есть известно, какое напряжение, поданное на вход соответствующей пары пластин, вызывает отклонение пятна на экране на одно деление координатной сетки (величины  $x$  и  $y$ ), то по полученным координатам

$x$  и  $y$  можно вычислить  $U_x$  и  $U_y$ , а затем найти соответствующие значения  $P$  и  $E$ :

$$U_x = \gamma_x x, \quad (4)$$

$$U_y = \gamma_y y, \quad (5)$$

$$P = \frac{C_2}{S} \gamma_y y, \quad (6)$$

$$E = \frac{r_1 + r_2}{r_2 d} \gamma_x x, \quad (7)$$

### Порядок выполнения работы

1. Включить осциллограф, вывести электронный луч в центр координатной сетки.
2. Включить источник питания.
3. Регулируя напряжение на источнике питания установить напряжение соответствующее предельной петле гистерезиса.
4. Расположить предельную петлю гистерезиса таким образом, чтобы она была симметрична относительно центра координатной сетки.
5. Измерить координаты вершины петли гистерезиса при максимальном напряжении в делениях координатной сетки.
6. Измерить по этой петле координаты, соответствующие удвоенной коэрцитивной силе и удвоенной остаточной

поляризации, в делениях координатной сетки (результаты занести в таблицу 2).

7. Зарисовать петлю гистерезиса, нанести горизонтальную и вертикальную оси.

8. Постепенно уменьшая напряжение до нуля, получить на экране осциллографа последовательность частных петель гистерезиса. Измерить для каждой из них координаты вершин ( $2x$  и  $2y$ ).

9. Результаты занести в таблицу 1.

**Таблица 1.**

<b>U, В</b>	<b>2x, мм</b>	<b>x, мм</b>	<b>U<sub>x</sub> = γ<sub>x</sub>x, В</b>	<b>E, В/м</b>	<b>2y, мм</b>	<b>y, мм</b>	<b>U<sub>y</sub> = γ<sub>y</sub>y, В</b>	<b>P, Кл/м<sup>2</sup></b>

10. Зная  $\gamma_x$  и  $\gamma_y$ , определить значения  $U_x$  и  $U_y$  для каждого значения  $U$  (см. формулы 4 и 5).

11. Вычислить значения  $E$  и  $P$  по формулам (6) и (7) для координат вершин всех полученных петель гистерезиса.

12. По полученным данным построить основную кривую поляризации, откладывая по оси абсцисс – значения  $E$  в В/м, а по оси ординат – значения  $P$  в Кл/м<sup>2</sup>.

13. Вычислить значения  $E_{коэр}$  и  $P_{ост}$ , пользуясь формулами (6) и (7), где  $x = x_{коэр}$  и  $y = y_{ост}$ .

14. Экстраполировать ветвь насыщения зарисованной предельной петли до пересечения с осью ординат и в соответствии с рис. 1, определить полную, индуцированную и спонтанную поляризации.

15. Определить значение эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{эфф}$  сегнетоэлектрика ВК-1 по величине поляризации, соответствующей вершине предельной петли:

$$\epsilon_{эфф} = \frac{P_{max}}{\epsilon_0 E_{max}}.$$

16. Результаты представить в виде таблицы 2.

**Таблица 2.**

<b>2x<sub>коэр</sub>, мм</b>	<b>x<sub>коэр</sub>, мм</b>	<b>E<sub>коэр</sub>, В/м</b>	<b>2y<sub>ост</sub>, мм</b>	<b>y<sub>ост</sub>, мм</b>	<b>P<sub>ост</sub>, Кл/м<sup>2</sup></b>	<b>P<sub>полн</sub>, Кл/м<sup>2</sup></b>	<b>P<sub>сп</sub>, Кл/м<sup>2</sup></b>	<b>P<sub>инд</sub>, Кл/м<sup>2</sup></b>

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков план проведения измерений гистерезиса сегнетоэлектрика?
2. Исходя из составленного плана проведения измерений, проанализируйте перечень необходимого оборудования для снятия кривой поляризации сегнетоэлектрика?
3. Для чего при планировании измерений необходимо учитывать температуру сегнетоэлектрика?
4. Каким информационным ресурсом нужно воспользоваться, чтобы найти инструкцию менеджмента безопасности лабораторий кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики?
5. Какой величиной характеризуют поляризационные свойства веществ?
6. Дайте определение вектора поляризации. Как он связан с поверхностной плотностью связанных зарядов?
7. В чем физический смысл диэлектрической проницаемости?
8. Какими отличительными свойствами обладают сегнетоэлектрики?
9. Как величина диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков зависит от температуры? Нарисуйте график этой зависимости.
10. Что такое предельная петля гистерезиса? Нарисуйте семейство петель гистерезиса.
11. Какие параметры сегнетоэлектриков можно определить с помощью петли гистерезиса?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА «ФЕРРОМАГНЕТИК-ПАРАМАГНЕТИК» ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

**Цель работы:** определение точки Кюри ферромагнитного образца методом электромагнитной индукции.

**Принадлежности:** ферромагнитный образец, автотрансформатор ЛАТР, миллиамперметр, нагревательная печь, измерительная индукционная обмотка, термopара.

#### Теоретическое введение

**ВНИМАНИЕ!!!** Работа с электричеством даже при низком напряжении может быть опасной - внимательно следуйте схемам подключения и инструкциям и всегда обращайтесь за советом к преподавателю, если вы в чем-то не уверены! При выполнении каждой лабораторной и практической работы необходимо соблюдать инструкцию по технике безопасности, которая размещена на сайте кафедры <https://swsu.ru/structura/up/ftd/kafedra-nt/instruktsii.php>

Ферромагнитными свойствами из элементов периодической системы Д. И. Менделеева обладают железо, никель, кобальт, некоторые редкоземельные металлы, а также их сплавы, причем эти вещества проявляют ферромагнитные свойства лишь при температурах ниже некоторой, определенной для каждого элемента или сплава температуры, называемой точкой Кюри. Это температура фазового перехода второго рода, обусловленного скачкообразным изменением магнитных и электрических свойств вещества. Температура Кюри, например, 770 °С для железа, 358 °С для никеля, 1130 °С для кобальта, 16 °С для гадолиния, – 168 °С для диспрозия. При более высокой температуре (и в самой точке Кюри) вследствие теплового движения атомов в ферромагнетиках

разрушается магнитный порядок и они переходят в состояние парамагнетиков.

При охлаждении ниже точки Кюри в ферромагнетике возникает самопроизвольная намагниченность, т. е. каждый кристалл образца оказывается намагниченным до насыщения. Если этот образец имеет форму бесконечно длинного стержня, ось которого совпадает с осью легкого намагничения, то все векторы спонтанного намагничения расположены параллельно друг другу и оси стержня. Такое состояние будет соответствовать минимуму магнитной энергии, так как размагничивающий фактор равен нулю и энергия размагничивающего поля также равна нулю. Энергия анизотропии будет минимальной, поскольку вектор намагничения параллелен оси легкого намагничения; минимальна и обменная энергия, так как все спиновые магнитные моменты расположены параллельно друг другу. Всякое изменение в расположении вектора спонтанной намагниченности привело бы к увеличению энергии и, следовательно, ферромагнетик перешел бы в неравновесное состояние. Однако реально такой случай осуществляется лишь в ферромагнитной пленке толщиной около 10 нм.

Большинство методов определения точки Кюри ферромагнетиков основано на регистрации резкого падения намагниченности исследуемого образца при нагревании его до температуры Кюри.

Метод электромагнитной индукции основан на изменении электродвижущей силы индукции в катушке, которая охватывает исследуемый образец, находящийся в переменном магнитном поле постоянной амплитуды. Измерить точку Кюри можно с помощью схемы, представленной на рисунке 1.

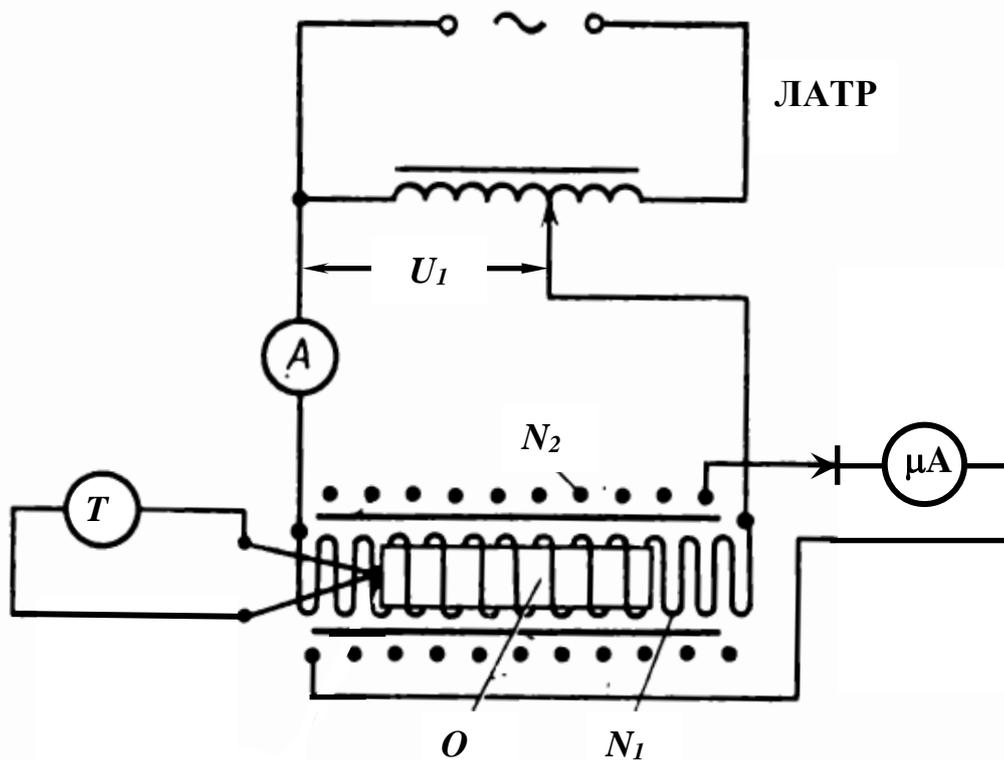


Рис. 1

Здесь образец  $O$  помещен в нагревательную печь. Обмотка печи  $N_1$  является одновременно и намагничивающей обмоткой, создающей переменное магнитное поле. Концы измерительной катушки  $N_2$  замкнуты на милливольтметр.

Первичная обмотка отделена от вторичной слоем теплоизолирующего материала.

Обмотка печи, измерительная катушка и образец представляют собой трансформатор, роль сердечника в котором играет образец. Напряжение на первичной обмотке, т. е. на обмотке печи, таково:

$$U_1 = U_R + U_L,$$

где  $U_R = i_1 R_1$  падение напряжения на омическом сопротивлении первичной обмотки, и  $U_L = -E_1$  падение напряжения на индуктивном сопротивлении, численно равное э.д.с. индукции, возникающей в первичной цепи. Таким образом,

$$E_1 = i_1 R_1 - U_1. \quad (1)$$

с другой стороны,

$$E_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt} N_1, \quad (2)$$

где  $\Phi_1$  – магнитный поток, пронизывающий один из витков первичной обмотки,  $N_1$  – число витков первичной обмотки.

Магнитный поток, пронизывающий каждый из витков вторичной обмотки, равен  $\Phi_2 = k\Phi_1$ , где  $k$  – коэффициент, учитывающий разницу сечений первичной и вторичной обмоток.

Для э.д.с. индукции во вторичной обмотке находим

$$E_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} N_2 = -k \frac{d\Phi_1}{dt} N_2 \quad (3)$$

где  $N_2$  – число витков во вторичной обмотке. Из выражений (2) и (3) следует, что  $E_2 = E_1 k (N_2/N_1)$ , или, учитывая выражение (1), получаем

$$E_2 = k \frac{N_2}{N_1} (i_1 R_1 - U_1), \quad (4)$$

откуда следует, что, когда температура образца достигает точки Кюри, коэффициент самоиндукции, а следовательно, и индуктивное сопротивление первичной обмотки резко уменьшаются и практически становятся равными нулю ( $E_1 \approx 0$ , тогда  $U_1 \approx i_1 R_1$ ). Поэтому в точке Кюри  $E_2 \approx 0$ .

Температура образца измеряется с помощью термопары Т.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему согласно рис. 1. Включить печь.
2. Образец (сердечник) вставить в центр печи.
3. Записать температуру (через каждые 5-10 °С) и значение тока  $i_2$  в цепи измерительной (вторичной) обмотки по показаниям миллиамперметра. Когда ток вторичной обмотки начнет уменьшаться, показания снимать при каждом изменении значения силы тока на миллиамперметре. Нагревание образца производить до тех пор, пока после крутого спада ток практически не перестанет уменьшаться. После этого печь отключить от источника тока.
4. Построить график зависимости  $i_2 = f(t)$ . Из графика при помощи экстраполяции области крутого спада кривой на прямую определить точку Кюри исследуемого ферромагнитного образца.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков план проведения измерений по определению температуры фазового перехода «ферромагнетик-парамагнетик»?

2. Исходя из составленного плана проведения измерений, проанализируйте перечень необходимого оборудования для снятия зависимости эффективного значения тока во вторичной обмотке от температуры?
3. Для чего при планировании измерений в работе используется переменное магнитное поле постоянной амплитуды?
4. Каким информационным ресурсом нужно воспользоваться, чтобы найти инструкцию менеджмента безопасности лабораторий кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики?
5. Почему сила тока во вторичной обмотке уменьшается при нагревании образца до точки Кюри?
6. Дайте определение точки Кюри.
7. Нужно ли учитывать температурный режим при проектировании устройств из ферромагнитных и сегнетоэлектрических материалов?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аплеснин С. С. Основы спинтроники [Текст]: учебное пособие. - СПб.: Лань, 2010. - 288 с.
2. Байков Ю. А., Кузнецов В. М. Физика конденсированного состояния [Текст]: учебное пособие. - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2011. - 296 с.
3. Карпенков, С.Х. Технические средства информационных технологий [Электронный ре-сурс]: учебное пособие/ С.Х. Карпенков. - 3-е изд., испр. и доп. - М. : Берлин : Директ-Медиа, 2015. - 376 с. // <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=275367>
4. Магнитные материалы микро- и наноэлектроники :учеб. пособие / А. Л. Семенов, А. А. Гаврилюк, Н. К. Душутин, Ю. В. Ясюкевич. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2012. –147 с.
5. Суздаев И.П. Электрические и магнитные переходы в нанокластерах и наноструктурах. – М.: URSS, 2012. – 480 с.
6. Физика сегнетоэлектриков. Современный взгляд. Под ред. Карин М. Рабе, Чарльз Г. Ана, Жан-Марк Трискона. Издательство: Бином. Лаборатория знаний. 2011.
7. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.-1032 с.
- Матухин В.Л. Физика твердого тела / В.Л. Матухин, В. Л. Ермаков. - М. : Лань, 2010. - 384 с.
8. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. – М.: Физматлит; Изд-во МФТИ, 2004. – 656 с.
9. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. т. 2, Москва, Мир, 1983, 422 с.
10. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Москва, «Наука», 1978. 792 с.